

SOI MOSFET フォトン検出器の集光構造による量子効率向上

[1] 組織

代表者：辻 寧英

(室蘭工業大学大学院工学研究科)

対応者：佐藤 弘明

(静岡大学電子工学研究所)

分担者：猪川 洋

(静岡大学電子工学研究所)

[2] 研究経過

フォトン検出器は、蛍光寿命検出や DNA マイクロアレイ、量子暗号技術等、近い将来に重要となる超高精度な微弱光検出技術への応用が期待されている。主要なデバイスとして、アバランシェ・フォトダイオード (APD) や光電子増倍管 (PMT) が既に利用されているが、電子増倍を行うため高電界を印加している。その結果、暗計数率 (光入射のない状態での誤計数率) の低減には限界があった。また、電子増倍の状態から回復するまでには相当の時間を必要とし、フォトン計数速度の向上にも原理的な限界があった。これに対し、ナノメートルサイズの細いチャンネルを有する SOI (silicon-on-insulator) MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect-transistor) を利用すると、数個のフォトン数に対応したステップ状の電流レベルを観測でき、フォトン検出器として動作できることが報告されている[1]。このフォトン検出器の興味深い特徴は、高電界印加や電子増倍を行わないため、暗計数率において APD や PMT よりも有利となる点である。一方で、フォトン計数率に寄与する量子効率が 1%以下と非常に低く、不利となっている。これは、光吸収体となる MOSFET チャンネル部の体積が小さいため、入射光のごく一部しか捉えられていないことによる。そこで本研究では、SOI MOSFET フォトン検出器における量子効率を大幅に向上させるため、大きな面積で捉えた入射光のパワーを微細な MOSFET チャンネル部に効率的に集める集光構造について検討する。具体的にはサブ μm サイズの金の表面プラズモンアンテナ[2]によって入射光を SOI 導波路モードと結合させ、SOI 導波路の構造を工夫した集光構造を検討し、量子効率 30% を達成する

SOI MOSFET フォトン検出器の実現を目指す。

本プロジェクトにおける SOI MOSFET フォトン検出器のデバイス設計には、光学的な解析が必要不可欠となる。ところが最近の数値解析技術をもってしても SOI MOSFET フォトン検出器のように比較的複雑な構造を全体的に扱うことは難しい。そこで本プロジェクトでは、例えば集光を行う部分、光導波路を伝搬する部分等で、電磁界解析手法を切り替えて効率的に解析するための検討を行ってきた。さらに、SOI MOSFET フォトン検出器の量子効率を向上させるための設計指針についても検討した。

以下、研究活動状況の概要を記す。

[3] 成果

(3-1) 研究成果

(1) 設計のための高効率数値解析について

- ・表面プラズモンアンテナに対して光が照射された場合の応答は、基本的に有限差分時間領域 (FDTD) 法によるフルウェーブ解析が必要と考えていたが、表面プラズモンアンテナは周期構造を有する回折格子であるため、厳密結合波近似 (RCWA) 法を使えば、格段に効率的な計算が出来る。
- ・表面プラズモンアンテナによって回折された光は、SOI 層の導波路モードと結合する。この導波路モードだけをビーム伝搬法 (BPM) によって計算すれば、FDTD 法よりも格段に効率的に (計算容量と計算時間が低減されて) 解が得られる。
- ・表面プラズモンアンテナからの回折光や、SOI 導波路モードの計算において解析手法を切り替えているので、回折光と導波路モード間の結合現象に対して解析手法間の接続が必要であり、具体的な接続方法は今後の課題とする。
- ・電磁界解析手法の切り替えに伴う計算結果の妥当性は、実験結果との比較が必要で今後の課題である。

(2) 表面プラズモンアンテナと SOI 光導波路を組み合わせた集光構造について

- ・シリコン中の「光の伝搬距離 vs. キャリア輸送距離」を勘案して、構造を検討する必要がある。シリコン中の光伝搬距離を消光係数 k によ

で見積もると、可視域では1 μm 伝搬させるのがやっと。特に 545 nm 以下の短波長側では数 nm ~ 数百 nm オーダーの短い距離しか伝搬できない。短波長側の光検出は、導波路モードを利用しない方式とする必要がある。

- SOI 中で励起されたキャリアが、MOSFET チャネル部に到達できなければフォトンを計数できない。この特性に着目すれば、光は SOI 中を伝搬するのではなく、外部の構造によって MOSFET チャネル部に誘導されるような方法を別途検討する方が現実的と考えられる。
- 光励起されたキャリアが電流に寄与するのか、または熱損失になるのかを数値計算によって検討できるようにする。

(3-2) 波及効果と発展性など

SOI MOSFET フォトン検出器における量子効率の欠点を克服するための光のアンテナを提供する。実際にデバイス設計を行う上で、集光現象の理論的な礎になる。その結果、高い量子効率、高い計数速度、低い暗計数率を同時に満たすような、従来のトレードオフを緩和するフォトン検出器が実現できる。SOI CMOS 技術によってデバイス集積化が容易であるため、従来よりも高度なフォトン検出技術としても期待される。イメージングだけではなく、高感度な分光光度計へ展開することによって、革新的な光計測技術を提供できるものと考えている。今後も検討を継続していく予定である。

[4] 成果資料

- (1) K. Ichikawa, Z. Zhang, Y. Tsuji, and M. Eguchi, "A single-polarization holey fiber with anisotropic lattice of circular air holes," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33, No. 18, pp. 3866-3871, Sep. 2015.
- (2) Hiroaki Satoh, Shohei Iwata, Daiki Sugiyama, Atsushi Ono, and Hiroshi

Inokawa, "Refractive Index Measurement toward Integrated Optical Biosensing by Silicon-On-Insulator Photodiode with Surface Plasmon Antenna," *The 14th International Conference on Global Research and Education (Inter-Academia 2015)*, 2015.

出張報告

なし